

**УДК 624.014**

**КРОКВЯНА МАЛОЕЛЕМЕНТНА ШПРЕНГЕЛЬНА СИСТЕМА З ОПТИМАЛЬНИМИ ГЕОМЕТРИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

**СТРОПИЛЬНАЯ МАЛОЭЛЕМЕНТНАЯ ШПРЕНГЕЛЬНАЯ СИСТЕМА С ОПТИМАЛЬНЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

**ROOF LOW-ELEMENT COMPOSITE SYSTEM WITH OPTIMUM GEOMETRICAL PARAMETER**

**Лавріненко Л.І., канд. техн. наук, доцент, Скупова А.В., магістр (Київський національний університет будівництва і архітектури)**

**Лавриненко Л.И., канд. техн. наук, доцент, Скупова А.В., магистр (Киевский национальный университет строительства и архитектуры)**

**Lavrinenko L.I., candidate of technical sciences, associate professor, Skupova A.V., graduate (Kiyv National University of Civil Engineering and Architecture)**

**Викладені результати експериментального проектування кроквяної ферми на основі малоелементної шпренгельної системи. Знайдені параметри геометричної схеми, що мінімізують показники металомісткості та вартості на стадіях виготовлення та експлуатації.**

**Изложены результаты экспериментального проектирования стропильной фермы на основе малоэлементной шпренгельной системы. Получены параметры геометрической схемы, минимизирующие показатели металлоемкости и стоимости на стадиях изготовления и эксплуатации.**

**The results of experimental design of the roof low-element composite truss. The optimum geometrical parameter minimized weight and cost in the fabrication and operation has exposed.**

**Ключові слова:**

**Шпренгельна ферма, цільова функція, змінні проектування, геометричні параметри**

**Шпренгельная ферма, функция цели, переменные проектирования, геометрические параметры**

**Composite truss, objective function, state variables, geometrical parameter.**

**Стан питання та задачі дослідження.** Розробка та дослідження нових типів стержневих кроквяних систем розвивається у напрямку конструкцій, конкурентоздатних за показниками металоємності та вартості відносно інших

прогресивних типових конструкцій, та таких, що надають переваги в області технологічності, виготовлення та монтажу, а також в області експлуатації як усього покриття, так і будівлі в цілому.

Цим обумовлене проведене дослідження сталевої малоелементної ферми під похилу покрівлю, яка включає жорсткий верхній пояс з похилом  $i=1/8\dots 1/12$ , що передбачає позавузлове прикладання навантаження, та шпренгель з двома стояками і центральною V-подібною вставкою, гілки якої сприймають та перерозподіляють тільки кососиметричні складові несиметричних навантажень та впливів [1].

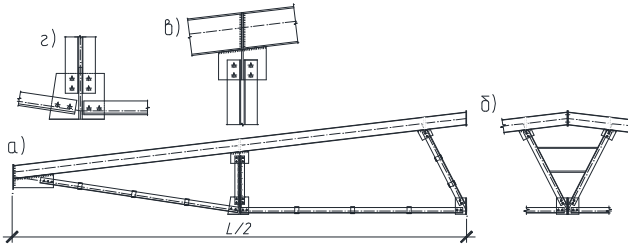


Рис 1. Конструктивне рішення малоелементної шпренгельної ферми із застосуванням прокатних профілів: а-відправна марка ферми; б-гребеневий вузол та варіант V-подібної вставки; в,г-варіанти вузлів на болтах

**Даний об'єкт досліджується** на предмет пошуку оптимальної геометрії (без зміни топології), розподілу зусиль та матеріалу відповідно до вимог будівельних норм з врахуванням умов, що відображають специфіку конструкції та конкретні умови проектування за критерієм мінімуму витрат ресурсів на стадіях виготовлення та експлуатації конструкції [2].

Особливістю такої ферми є неповна схема решітки (тобто кінематично змінюваного шарнірного ланцюга) та позацентрове сприйняття зусиль верхнім поясом. Ферма надзвичайно чутлива до змін геометричних параметрів конструктивної схеми, цілеспрямований вибір яких надає змогу створити потрібний (за деяким критерієм) розподіл зусиль в її елементах.

Оптимальне проектування в сучасному розумінні представляє собою ціленаправлений вибір параметрів розгляданої конструкції, що забезпечує найкращий по заданому критерію результат. Такими критеріями можуть бути економічні: матеріалоемність, вартість «в ділі», сума разових і експлуатаційних витрат, зведених до однієї розмірності (приведені витрати) та ін., а також фізичні – наприклад, рівнонапруженість, мінімум маси або об'єму, максимум сприйняття навантаження тощо, що непрямо впливає на ефективність конструкції. В загальному вигляді така задача відносно малоелементної шпренгельної ферми згадувалася в [3].

**Методика досліджень.** Задача пошуку оптимальних геометричних та жорсткісних параметрів ферми є задачею оптимального проектування конструкції та через нелінійність цільових функцій та обмежень вимагає постановки

з використанням процедур нелінійного програмування. Можуть бути розглянуті декілька критеріїв оптимальності (тобто мінімізуватися декілька цільових функцій).

Найпоширенішим критерієм оптимізації є маса конструкції :

$$M = \sum_i \rho \cdot A_i \cdot L_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $\rho$  - питома вага матеріалу,  $A_i$  - змінна проектування,  $L_i$  - фіксований параметр, пов'язаний з  $i$ -тим елементом конструкції (наприклад, для стержневої конструкції  $A_i$  – площа поперечного перерізу елемента, а  $L_i$  – довжина стержня).

При проектуванні конструкцій із зміною матеріалів, які відрізняються питомою міцністю та вартістю, в якості критерію використовується вартість конструкції. Оскільки вартість матеріалу складає приблизно 70% вартості конструкції, застосування цього критерію часто є виправданим.

Більш об'єктивно (с точністю до змін в цінах) враховуються всі витрати критерієм приведених витрат (з урахуванням вартості огорожувальних і суміжних конструкцій, а також експлуатаційних витрат при зміні геометричних параметрів конструктивної схеми):

$$П = C_{\text{ділі}} + C_{\text{с.к.}} + C_{\text{експл.}} \rightarrow \min. \quad (2)$$

Критерій, що називається «вартість в ділі» ( $C_{\text{ділі}}$ ), враховує вартість заводського виготовлення ( $C_{\text{зав}}$ ), монтажу ( $C_{\text{монт}}$ ), а іноді і вартість транспортування конструкції ( $C_{\text{тр}}$ ). Разові витрати, представлені вартістю в ділі, також багато у чому обумовлюються складом змінних параметрів проектування. При вирішенні часткової задачі оптимального розподілу матеріалу в системі з заданими розмірами може бути зменшена металоємність несучих конструкцій. Інші її показники (трудомісткості виготовлення и монтажу, транспортбельність тощо) майже не змінюються:

$$C_{\text{ділі}} = M(C_{\text{зав}} + C_{\text{монт.}} + C_{\text{тр.}}) \quad (3)$$

За зміни габаритних розмірів конструкції при її оптимізації необхідно врахувати відшкодування затрат, що виникають при експлуатації об'єкту. Значну частину затрат складають енергетичні витрати на опалення, вентиляцію додаткового об'єму будівлі, занятого конструкцією покриття, залежних від шуканих величин  $H$  і  $h$ . Дещо важче визначити вплив варіації параметрів на амортизаційні та інші експлуатаційні витрати. З іншої сторони очевидно, що витрати на електроосвітлення, водопостачання, прибирання підлоги, перегородок, скляних поверхонь варто виключити з розгляду. Як показали розрахунки, витратами на прибирання снігу з покрівлі також можна знехтувати через їхню незначний вплив на шукані параметри. Таким чином:

$$C_{\text{експл.}} = (V \cdot C_{\text{тепл.ен.}} + S \cdot C_{\text{експл.витр.}}) \gamma, \quad (4)$$

де  $V$  – об'єм простору будівлі,  $S$  – площа будівлі,  $\gamma$  – коефіцієнт, що враховує нормативний термін експлуатації будівлі.

У вартість конструкції також включається такий показник, як вартість суміжних конструкцій ( $C_{\text{с.к.}}$ ). З зовнішньої сторони покриття розміщуються панелі і настил, а із збільшенням висоти ферми розмір площі покрівлі збіль-

шується, що тягне за собою збільшення вартості покрівлі. Аналогічну ситуацію спостерігаємо із стіновими панелями:

$$C_{с.к.} = (C_{\text{покрівлі}} \cdot l + C_{\text{стін.пан.}} \cdot (H - h)) B, \quad (5)$$

де  $B$  – крок ферм,  $l$  - довжина верхнього поясу ферми.

Аналітичні залежності між параметрами проектування і функцією цілі можуть бути суттєво доповнені відомостями про трудовитрати виготовлення, транспортування та монтажу досліджуваних конструкцій.

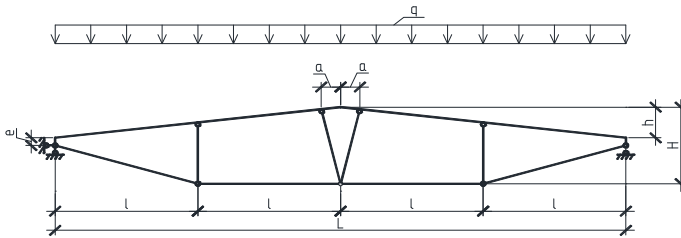


Рис.2. Геометричні параметри ферми

Параметрами стану є внутрішні зусилля, що обумовлюють величини таких змінних проектування як площі поперечних перерізів (або інші геометричні характеристики перерізів, апроксимовані залежностями, показаними на рис.3).

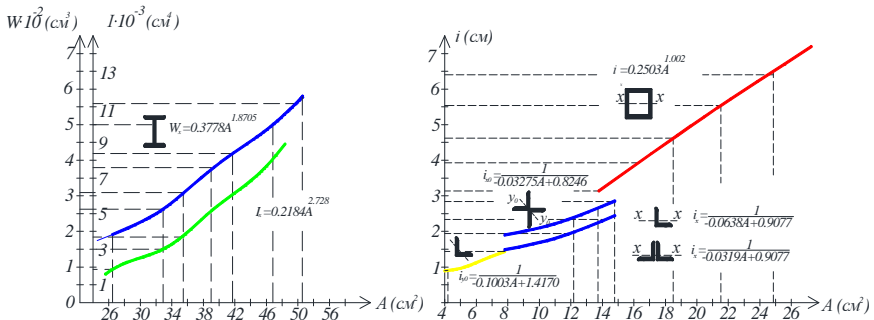


Рис. 3. Апроксимуючі криві і функції геометричних характеристик профілів:  
а – для стиснуто-згинних елементів; б – для центрально навантажених елементів

Виділено параметри проектування, що спричиняють найбільший вплив на описані критерії: висота ферми, похил верхнього поясу, ексцентриситет опорного вузла, розкриття елементів, що утворюють V-подібну вставку (проте, отримані рішення показали, що величина розкриття V-елемента, яка обумовлена асиметрією навантаження, досягає певного мінімального значення, при досягненні якого вирішальним стає симетричне навантаження, і в число змінних проектування може не включатися). Комбінація інших параметрів

проекування створює такий розподіл зусиль, що несуча здатність верхнього поясу (найбільш металомісткого елемента) вичерпується одночасно в декількох перерізах одночасно.

Обмеження записані у вигляді перевірок несучої здатності за ДБН В.2.6-163-2010 «Сталеві конструкції» та доповнені обмеженнями на уніфікацію перерізів та конструктивними обмеженнями.

В загальному вигляді модель задачі оптимального проектування формується таким чином: мінімізувати  $f(b, z)$  за умови  $g_i(b, z) \leq 0, i=1, m$ . Алгоритм оптимізації реалізований в формі методу прямого пошуку Нелдера-Міда з штрафними функціями, побудованого в розвиток регулярного симплексного методу Спендлі-Хекста-Міда, що допускає використання неправильного багатогранника (метод деформованого багатогранника), є достатньо надійним методом послідовної мінімізації і вважається найбільш ефективним при  $n \leq 6$  [4].

Шлях розв'язання задачі оптимального проектування зображений на рис.4; він є компактним та максимально зручним для роботи.

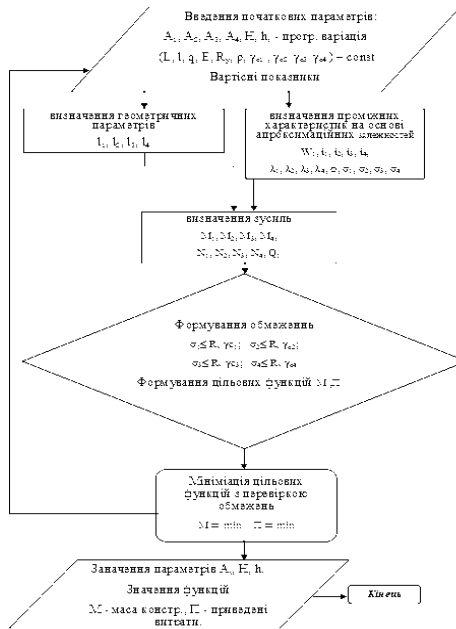


Рис. 4. Схема обчислювального процесу

В результаті досліджень виявлено, що наявність активних або наближених до активних обмежень за несучою здатністю елементів свідчить про можливість дискретно-рівномірної оптимізації. Отримана при розв'язанні великої кількості задач оптимізації інформація дозволяє вказати як на харак-

терну особливість даної конструкції неістотно мале збурення функції цілі при зміні тих параметрів проектування, що описують площі елементів. Це дає можливість відповідні обмеження замінити рівняннями та здійснити перехід до дискретно-рівномірного рішення. Таким чином розмірність задачі скорочується, а конструкція на кожній ітерації розраховується повністю. Відповідність параметрів стану отриманому таким чином розподілу жорсткостей встановлюється внутрішньою підзадачею мінімізації різниці площ, отриманих на суміжних кроках підзадачі при перерахунку конструкції.

В такій постановці виключаються складності, пов'язані з пошуком глобального оптимуму цільової функції, тому що перетворена задача за результатами експериментів на заданому інтервалі змінних є унімодальною. Чисельно показано, що в дискретно-рівномірній постановці задача є унімодальною.

При розв'язанні задачі в повній постановці з використанням як вихідного проекту рівномірного рішення суттєвих покращень функції не отримано.

Обмеження на прогин отриманої таким чином конструкції не є активним, та розглядається як перевірочне.

Вирішено серії задач для виявлення області раціонального застосування малоелементної шпренгельної ферми через визначення оптимальних значень параметрів проектування та цільових функцій при варіюванні компонентів вартості, а також побудувати сортаментний ряд ферм під навантаження для умов Києва (рис.5).

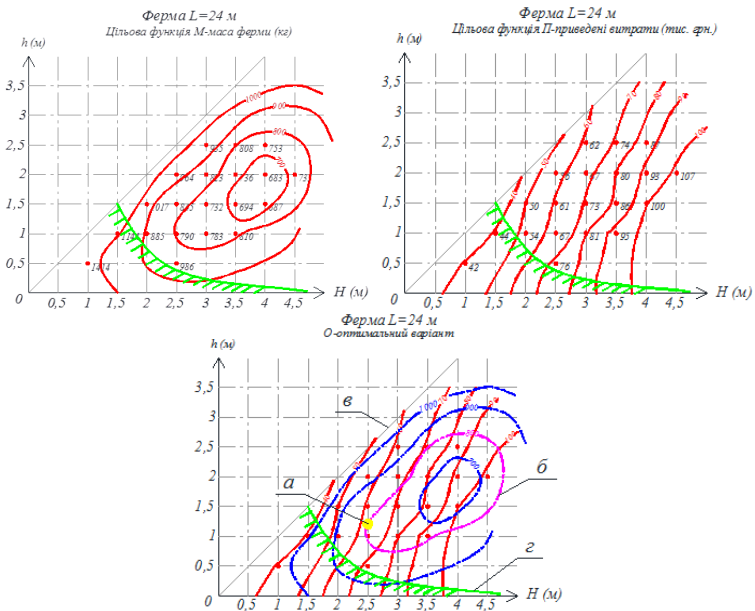


Рис.5 (початок)

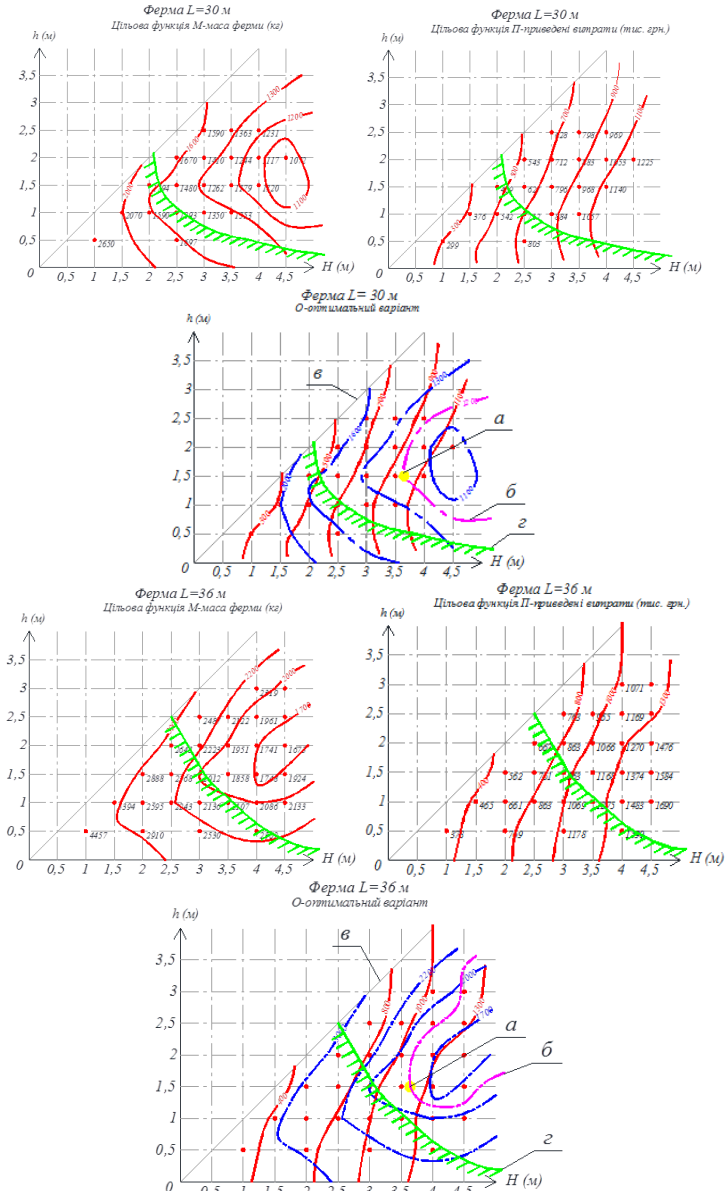


Рис. 5 (закінчення). Лінії рівнів цільових функцій: М – маса ферми; П – приведені витрати; О – сумісні рішення; а – оптимальне сумісне рішення; б – рівень 15%-вих витрат за функцією М; в – границя області допустимих рішень за конструктивною ознакою; г – границя області допустимих рішень за прогинами

**Висновки.** Отримані результати дали змогу рекомендувати вказане конструктивне рішення як ефективне та економічне за кожним критерієм При узгодженні критеріїв отримані сумісні рішення в області (10...20)%-вих втрат за обома функціями. Всі рішення належать до області конкурентоспроможних відносно до існуючих споруд аналогічного призначення. Застосування апарата оптимального проектування дозволило отримати конструктивне рішення малоелементної шпренгельної ферми, металомісткість якого менша, а приведені витрати не перевищують аналогічних показників кроквяної ферми з замкнених гнutoзварних профілів «Молодечно»

Головною досліджуваною кроквяної ферми є простота її виготовлення. Конструктивне рішення надає широкі можливості застосування у верхньому поясі, маса якого складає близько 80% від маси конструкції, не тільки прокатного двотавра чи гнutoзварного замкненого профілю, а й ефективних двотаврових профілів з гофрованою стінкою. Конструктивний коефіцієнт при цьому не перевищує 1,05...1,08 [5,6]. Розроблено конструктивні рішення у варіанті зварної ферми з двох відправних марок, а також варіант з болтовими з'єднаннями в усіх вузлах (див. рис.1). Це надає можливість перевезення конструкцій розсипом в транспортних пакетах з спеціальним пакуванням та додатково отримати економію за рахунок транспортних витрат.

**1.** Нилов А.А., Лавриненко Л.И. Малоэлементные шпренгельные конструкции покрытий производственных зданий // Совершенствование сварных металлических конструкций/ Под ред. М.М.Жербина. – К., Наукова думка. -1992. – С.111-123. **2.** Лавріненко Л.І., Нілов О.О., Лазнюк М.В. Малоэлементна шпренгельна ферма із V-подібною стабілізуючою вставкою: Патент на корисну модель UA №71800 U, МПК E04C3/08 (2006.01), публ.25.07.2012, Бюл.№14. **3.** Permyakov V.A., Remennikov A.M. General Purpose Code for Steel Structures Optimal Design// Computer and Structures. Vol.48, №6, pp.1155-1164, 1992. **4.** Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1976. – 536 с. **5.** Нилов А.А., Мартынюк А.Я., Лазнюк М.В., Рыженко С.С. Применение сварных двутавров с гофрированной стенкой в комбинированных конструкциях// Современные строительные конструкции из металла и древесины: Сб. научных трудов, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, №14, часть 1. – Одесса, 2010, - с. 169 – 175. **6.** Лавріненко Л.І., Лазнюк М.В., Нілова Т.О. Резерви несучої здатності та застосування профілів із поперечно гофрованими стінками в легких металевих конструкціях // Донбас-Ресурс 2011. Якість і безпека в будівництві / Тези доповідей конференції. – К.: Видавництво «Сталь», 2011. – С. 77–80.